

微小強磁性体の微細磁区構造と伝導

著者	金 承 九
号	2512
発行年	1999
URL	http://hdl.handle.net/10097/7785

氏 名	キム スン グ 金 承 九
授 与 学 位	博士（工学）
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）材料物性学専攻
学 位 論 文 題 目	微小強磁性体の微細磁区構造と伝導
指 導 教 官	東北大学教授 深道 和明
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 深道 和明 東北大学教授 藤森 啓安 東北大学教授 島田 寛 東北大学助教授 大谷 義近

論 文 内 容 要 旨

第1章 序論

最近、半導体関連技術として用いられてきた電子線リソグラフィ法やドライエッチング法などの微細加工技術が磁性体薄膜に積極的に応用され、強磁性体のサイズや構造をサブミクロンスケールで人為的に制御することが可能になってきた。強磁性体に微細構造を付加すると、構造を反映した形状磁気異方性が新たに加わり、結晶磁気異方性やスピン間交換相互作用との競合を通じて特異な磁区や磁壁構造が出現する。例えば、交換長程度の線幅を有する強磁性細線を作製すると磁化の自由度は細線に沿って右あるいは左に限られ、磁化反転は細線中を伝搬する磁壁によって進行する。また、微小細線中に単一磁壁を閉じこめたり、周期的な磁区構造を安定化させることも原理的に可能である。このような微細加工を用いた磁化状態制御は、記録媒体や磁気固体メモリー等の磁気デバイスを設計する上で重要な役割を果たす。更に、周期的な磁壁により分割された微小磁区配列は擬似的な磁気多層膜とみなせるため、その動態やそれらが電気伝導に及ぼす効果に注目が集まっている。

本研究の目的は、サブミクロンスケールの強磁性細線を作製して細線の微細磁区構造と伝導の相関、特に磁壁移動による磁化反転過程、磁気抵抗効果に対する磁壁の寄与を解明することである。磁壁の磁気抵抗効果への寄与として、伝導電子の軌道の効果、スピン依存伝導および位相の効果が期待される。伝導電子の軌道およびスピン依存伝導を調べるために、散乱中心密度の低い、結晶磁気異方性の異なる Fe および Co 単結晶強磁性細線を用いて実験を行った。位相の効果は、散乱中心密度が高く伝導電子の軌道よりこの効果が支配的になる多結晶 Co 強磁性細線を用いて調べ、特に極低温での弱局在の有無、また弱局在と磁壁の相関について注目した。

第2章 試料作製および実験方法

極微小構造磁性体を作製するためには、平面および厚み方向をナノスケールで加工制御する必要がある。本研究では、平面微細加工法として電子線リソグラフィ法を、厚み方向の制御法として電子線蒸着成膜法、マグネトロンスパッター成膜法と分子線エピタキシー成膜法を用いた。磁気抵抗効果の測定は直流4端子法で行い、印加磁場範囲 $-9 \sim 9$ T、測定温度範囲 $2 \sim 300$ K において測定した。微細磁区構造は磁気力顕微鏡（MFM）を用いて行った。

第3章 単結晶強磁性細線

本章では伝導電子の軌道およびスピン依存散乱による効果に着目した実験結果について考察した。軌道の効果を調べるためには、不純物、結晶粒界や格子欠陥等の弾性散乱中心の少ない高純度の媒質を用いて調べる必要がある。また、磁壁によるスピン依存散乱を調べる上で、磁壁幅は重要な物理因子となる。ここでは、Fe および Co エピタキシャル単結晶細線を用いた。磁壁幅は Fe と Co の両強磁性体の結晶磁気異方性の差に起因して大きく異なる。

1) Fe 単結晶強磁性細線

MgO(001)[100]基板上に成膜された Fe(001)[110]エピタキシャル膜は4回対称の磁化容易軸と磁化困難軸を持つ。細線は[110]方向の磁化困難軸に平行に作製されており、細線中には周期的な磁壁で分割された磁区構造を取る。細線幅は2 μm 、膜厚は50と100 nmの2種類である。残留抵抗比と残留抵抗率はそれぞれ36と0.36 $\mu\Omega\text{cm}$ であり、弾性散乱中心の少ない高品位の試料と見なせる。従って、電子の弾性散乱による緩和時間も多結晶の場合より長くなり、磁気抵抗効果にサイクロトロン運動に起因するローレンツ磁気抵抗効果が大きく寄与することになる。

図1に8 Kと200 Kの磁気抵抗率曲線を示す。8 Kの磁気抵抗率曲線において横磁気抵抗率曲線が縦磁気抵抗率曲線より大きな磁気抵抗率を示し、200 Kにおいてその関係が逆転する。一般に、横磁気抵抗測定配置のローレンツ磁気抵抗効果は縦磁気抵抗配置の場合より大きな寄与を示し、異方性磁気抵抗効果は逆の関係を示す。上述の結果は、8 Kにおいてローレンツ磁気抵抗効果が支配的になり、200 Kでは異方性磁気抵抗効果が支配的にあることを意味する。また、印加磁場の方向に関係なく残留抵抗値が同じ値を示すことから、残留磁化状態が同一であることが示唆される。残留磁化状態は図1の内挿図に示すように、MFM像観察より印加磁場の方向に関係なく同じ微細磁区構造を取ることが確認された。磁区構造は180°磁壁を挟んだ平行磁区と三角形の垂直磁区からなり、各々の体積分率は0.5である。したがって、磁壁抵抗率は残留抵抗値から各々平行と垂直磁区の抵抗率を差し引き $\rho_{\text{wall}} = \rho_0 - (\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}) / 2$ として求められる。ここで、 ρ_{\perp} と ρ_{\parallel} はそれぞれ垂直磁区と平行磁区の抵抗率である。図2に厚さ50 nm, 100 nmの単結晶 Fe 強磁性細線の磁壁抵抗率の温度依存性を示す。図から約60 K以下の温度において負の磁壁抵抗率が出現する。図2の挿入図に負の磁気抵抗率出現機構の模式図を示す。磁壁を挟んだ左右の磁区内に生じる内部磁場は反平行である。磁壁を通過する際伝導電

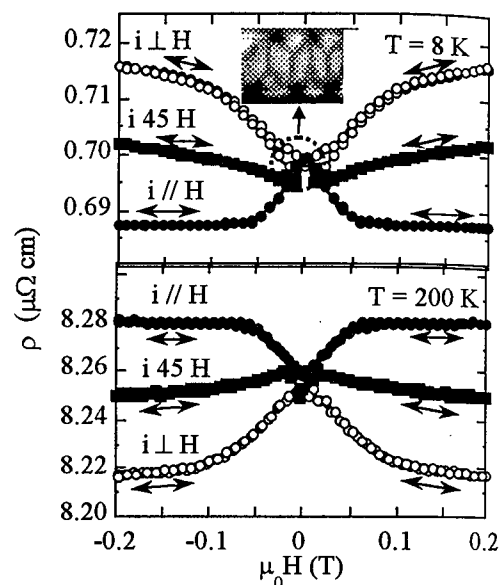


図1 単結晶 Fe 強磁性細線の8 K、200 Kの磁気抵抗率曲線。図中に残留磁化状態のMFM像を示す。

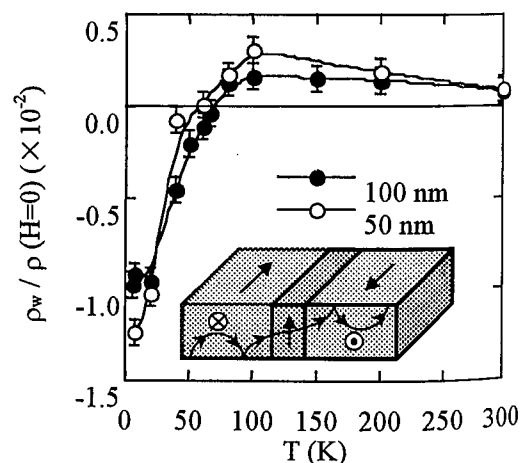


図2 単結晶 Fe 強磁性細線における磁壁の電気抵抗率への寄与。図中に表面散乱の減少の模式図を示す。

子に加わるローレンツ力の向きは磁壁を境に逆転するために軌道は波打ち、見かけ上長い距離を移動するために表面散乱が減少する。この効果は、伝導電子の平均自由行程が磁壁幅と同程度の場合に顕著になることが予想され、磁壁幅が約 40 nm、平均自由行程が約 44 nm 程度であることより Fe 単結晶強磁性細線における負の磁壁抵抗は表面散乱の減少により説明される。

2) Co 単結晶強磁性細線

本節では伝導電子の軌道の効果において、磁壁幅が上述の Fe よりも薄い Co 場合について述べた。磁化容易軸である c 軸に対して垂直の細線を作製した。結晶磁気異方性と形状異方性の競合により細線に対し垂直な磁化を持つ周期的に配列した微小多磁区構造が安定な残留磁区構造となることが予想される。

Co 単結晶強磁性細線の場合、全測定温度範囲において異方性磁気抵抗効果が支配的になり、縦磁気抵抗率曲線が横磁気抵抗率曲線より高い磁気抵抗値を示す。図 3 に残留磁化状態の MFM 観察結果と共に 8 K の磁気抵抗率曲線の低磁場領域の拡大図を示す。図から判るように磁壁を挟んだ多磁区構造を有する縦磁気抵抗率曲線の残留抵抗率が単磁区構造の横磁気抵抗率曲線の残留抵抗率より高い磁気抵抗率を示す。即ち、磁壁の存在により抵抗は上昇する。図 4 に磁壁抵抗の温度依存性を示す。全測定温度範囲において磁壁抵抗の値は正を示す。多層膜の非磁性層を挟んで反強磁性配列を取る GMR 構造と磁壁を挟んで反強磁性的配列を取る縞状磁区構造は類似している。すなわち、磁壁幅が薄くなるに従って GMR 的な効果が期待される。Co 単結晶強磁性細線中の磁壁幅が比較的薄いこと、および磁壁の界面抵抗と CoCu 多層膜の界面抵抗値がほぼ等しい値を示すことより、正の磁壁抵抗はスピン依存散乱によるものであると判断される。

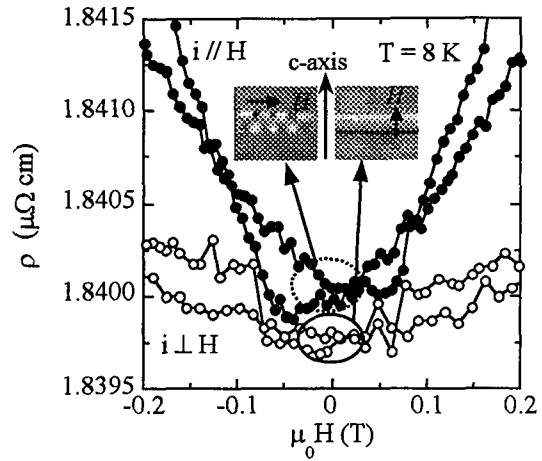


図 3 単結晶 Co 強磁性細線の 8 K の磁気抵抗率曲線。図中に残留磁化状態の MFM 観察(c-axis ⊥ 細線)を示す。

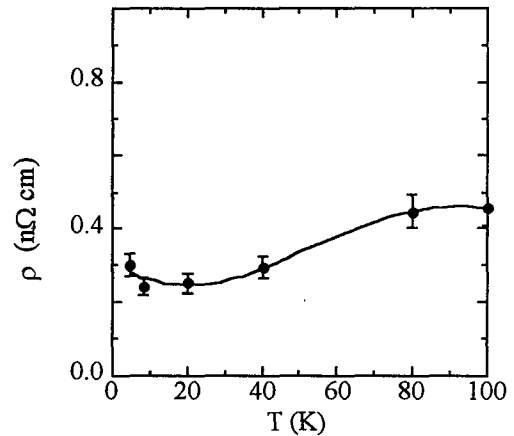


図 4 磁壁による磁気抵抗率への寄与の温度依存性(c-axis ⊥ 細線)

第 4 章 多結晶 Co 強磁性細線

本章では単結晶細線に比べ、散乱中心密度が高い多結晶 Co 強磁性細線を用いて磁壁に対する位相の効果を調べた。

図 5 に磁気抵抗率の跳び $\Delta\rho_{\text{jump}}$ と磁壁を含まない状態の残留抵抗率 ρ_0 の温度依存性を示す。挿入図は縦磁気抵抗率曲線を示し、 $\Delta\rho_{\text{jump}}$ は細線の異方性磁気抵抗効果と磁壁の寄与により現れる跳びである。温度 15 K 近傍に観測される不連続な変化 $\Delta\rho_{\text{AMR}}$ は細線中にピン止めされた磁壁内のスピンの回転による異方性磁気抵抗効果に起因する。15 K 以下の温度領域では温度の降下とともに $\Delta\rho_{\text{wall}}$ は増大する。この温度領域で異方性磁気抵抗効果はほぼ一定であり、 $\Delta\rho_{\text{wall}}$ の増大を説明することはできない。また、 ρ_0 は温度の降下とともに単調に減少し約 15 K で極小値を取った後、再び増加する。これらの結果は、

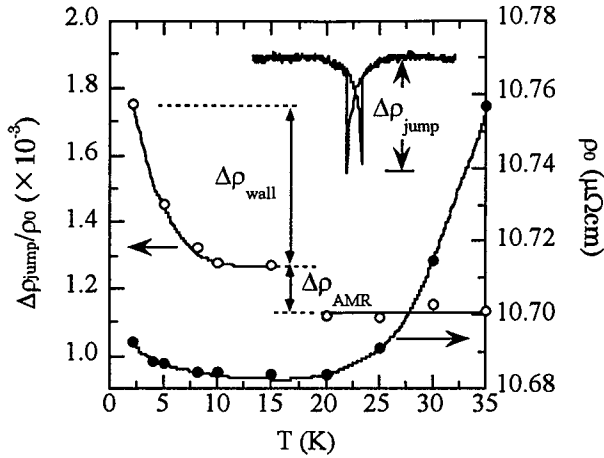


図 5 多結晶 Co 強磁性細線の ρ_0 および $\Delta \rho_{\text{jump}}$ の温度依存性

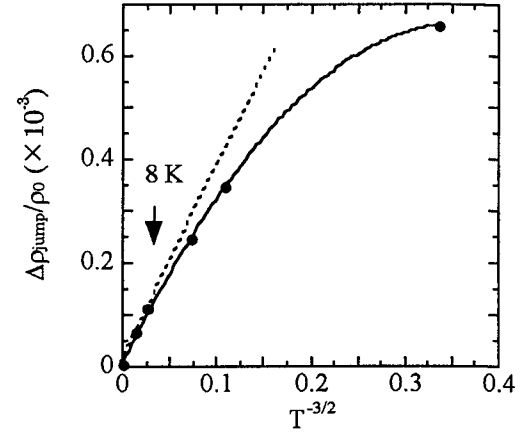


図 6 多結晶 Co 強磁性細線の $T^{-3/2}$ に対する $\Delta \rho_{\text{jump}}$ の温度依存性

格子欠陥などによる多重弾性散乱により、伝導電子が局在する弱局在を磁壁が抑制することを示唆する。すなわち、磁壁のスピンの反転に伴う散乱により電子波は干渉しなくなり、局在していた伝導電子が比較的自由になり電気抵抗率は減少する。磁壁による散乱を除く非弾性散乱の寄与は磁壁による弱局在の抑制を考えると $T^{-2/3}$ に比例する。図 6 に $T^{-3/2}$ に対して $\Delta \rho_{\text{wall}}$ の温度依存性を示す。約 8 K 以下の温度において直線関係から外れていく。このことから磁壁による弱局在の抑制が起こることは明らかである。

第 5 章 総括

本論文における主な結果をまとめた章である。

審査結果の要旨

最近、半導体関連技術として用いられてきた電子線リソグラフィ法やドライエッチング法などの微細加工技術が磁性体薄膜に積極的に応用されはじめ、強磁性体のサイズや構造をサブミクロンスケールで、人為的に制御することが可能になってきた。微小細線中に単一磁壁を閉じこめたり、周期的な磁区構造を安定化させることも原理的には可能である。著者はこの微細加工技術を用いて磁化の自由度を単純化させた強磁性細線を用いて、今まで無視されてきた磁壁抵抗について詳細に調べた。本論文はこれらの研究成果についてまとめたもので、以下に示す全文 5 章よりなる。

第 1 章では、序論であり、強磁性体の微小化により期待される現象について概説している。

第 2 章では、試料作製および実験方法について説明している。主に平面微細加工に用いられた電子線リソグラフィ法および厚み方向の制御法として用いられた電子線蒸着成膜法、分子線エピタキシー成膜法などについて詳しく述べている。

第 3 章では、磁壁による伝導電子の軌道の効果およびスピン依存伝導を調べるため、散乱中心密度が少なく結晶磁気異方性の差により磁壁幅が異なる単結晶 Fe, Co 強磁性細線を用いた実験結果について議論している。単結晶 Fe 強磁性細線の細線の場合は表面散乱の減少により約 66 K 以下の温度領域において負の磁壁抵抗を示す。一方、単結晶 Fe 強磁性細線に比べ磁壁幅が薄い単結晶 Co 強磁性細線の場合、磁壁によりスピン依存散乱が起きる。その結果、正の磁壁抵抗を示すことを明らかにしている。

第 4 章では、散乱中心密度が高く伝導電子の軌道より位相の効果が支配的になる多結晶 Co 強磁性細線を用いて磁壁抵抗を調べた結果を議論している。特に、極低温での弱局在の有無、また弱局在と磁壁の相関について詳細に調べている。10 K 以下の温度領域において弱局在が生じ、8 K 以下の温度領域において磁壁による弱局在の抑制のため、負の磁壁抵抗が観測されることを指摘している。

第 5 章は上述した結果をまとめた総括である。

以上述べたよう磁化の自由度が単純化された強磁性細線を用いて磁気抵抗測定により磁壁の挙動を調べ、異なる散乱中心密度および磁壁幅を用いて磁壁と電気抵抗との相関を明らかにし、磁気工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。